

## Forschung

# Kohlefaserlamellen zur Verstärkung von Holzbalken

Bei Renovation von Gebäuden ist vielfach eine Verstärkung der bestehenden Struktur notwendig. Um den nötigen Beitrag zur Gebrauchstauglichkeit sowie eine kosteneffiziente Lösung zu erhalten, müssen die Lamellen vorgespannt werden. Bei der im Forschungsprojekt «OnSite» untersuchten Methode besteht im Gegensatz zu anderen Verfahren keine Delaminierungsgefahr.

Von Martin Lehmann, Reto Clénin, Klaus Richter, Milena Properzi\*

**Herstellung eines Prüfkörpers mit praxisnahen Abmessungen (160 x 120 Millimeter). Die Kabel des CarboHeaters sind im Vordergrund sichtbar.**

Vorgespannte Kohlefaserlamellen werden bereits zur Sanierung von Stahlbeton und alten Gusseisen-Strukturen kommerziell angewendet. Bis heute konnten diese Methoden jedoch nicht erfolgreich im Holzbau eingesetzt werden. Dies hauptsächlich, weil die Vorspannkraft nicht effizient in das Tragwerk eingeleitet werden konnte. Dies zeigte sich im vorzeitigen Ablösen des Ver-

stärkungsmaterials durch lokale Überbeanspruchung in der Einleitungszone der Vorspannkraft. Versuche, dieses Versagen mit speziell an die Eigenschaften des Holzes angepassten Klebstoffen zu umgehen, führten meist zu einem Querkzugversagen des Holzes etwa zwei Zentimeter oberhalb der Lamelle. Die Verwendung eines duktilen Klebstoffs um eine Spannungsspitze am Balkenende zu ver-

meiden, führte zu inakzeptablen Kriechdeformationen. An der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau (BFH-AHB) wurden in Kooperation mit der Empa und später in Zusammenarbeit mit Carbo-link zwei Projekte mit dem Ziel, die Methode der Gradientenvorspannung im Holzbau anzuwenden, durchgeführt. Die Resultate zeigten, dass diese Methode grundsätzlich auch im Holzbau einsetz-



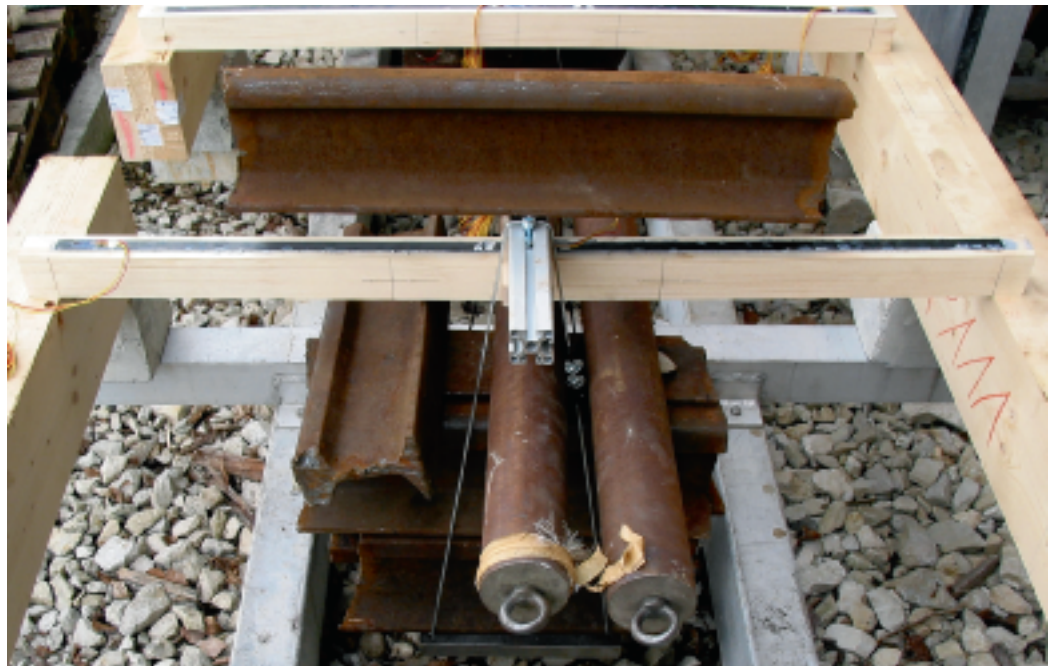
bar ist. Zur Montage der Lamellen ist jedoch ziemlich sperriges und schweres Equipment notwendig, was die Verwendung bei Umbauten erheblich erschwert. Im Projekt «OnSite» wurde deshalb speziell die Anwendung im Umbau untersucht.

### Ziele des Projekts «OnSite»

Im Projekt wurden verschiedene epoxybasierte Klebstoffe von Sika auf ihre Eigenschaften in Kombination mit Holz und Carbon-Faser verstärktem Kunststoff (CFK) getestet. Des Weiteren wurde die Wirkung von unterschiedlichen Vorspannungs-Niveaus auf die Tragfähigkeit sowie die Durchbiegung der Balken untersucht und ein analytisches Berechnungsverfahren entwickelt. Ziel des Projekts war es, ein anwender- und kundenfreundliches Verfahren zur Verstärkung von Holzbalken auf Baustellen zu entwickeln.

### Material und Methoden

Die Methode ist aufgrund der etwas höheren Materialkosten primär für Sanierungen von schützenswerten Strukturen gedacht. Die Vorspannung wird mittels Überhöhung des zu sanierenden Balkens vor der Verklebung der Kohlefaserlamelle erzeugt. Dies geschieht mit einer Schalungsstütze in der Mitte des Balkens. Das in den Balken induzierte Biegemoment ist dreieckförmig. Folglich ist die Schubspannung in der Klebefuge gleichmässig über die Länge verteilt und die Vorspannkraft in der Karbonlamelle gegen aussen abnehmend. Die Vorspannkraft kann über die Kraft in der Schalungsstütze eingestellt werden. Diese wird limitiert durch die Biegefestigkeit des Balkens sowie durch die Möglichkeit, die Balkenenden gegen Abheben zu fixieren. Es ist davon auszugehen, dass diese Methode bereits in der



Baupraxis zur Anwendung kam. Jedoch wurde nie eine verifizierte Berechnungsmethode des Vorspanneffekts publiziert. Um die volle Kapazität der Methode ausnutzen zu können und eine genaue Berechnung zu ermöglichen, wurde ein Berechnungsmodell entwickelt. Dies wurde durch Biegebruchprüfungen an Balken mit praxisnahen Abmessungen verifiziert. Um die Machbarkeit der Methode zu prüfen und den am besten geeigneten Klebstoff auszuwählen, wurden kleinere Prüfkörper mit einer Spannweite von einem Meter und unterschiedlichen Parametern hergestellt und getestet. Die Prüfkörper wurden aus produktionstechnischen Gründen umgedreht produziert. Der Klebstoff wurde bei den kleinen Proben bei 50 °C in einer Trocknungskammer ausgehärtet. Bei den grossen Proben wurde die Kohlefaserlamelle mittels des speziell zu diesem Zweck entwickelten Heizsystems von Sika, dem «CarboHeater» auf 90 °C erhitzt. Dies ermöglichte eine Aushärtung des Klebstoffs innerhalb nur einer Stunde. Die Biegeprüfungen wurden nach SN EN 408:2003 durch-

geführt. Während der Produktion und der Prüfung wurde die Dehnung in der Kohlefaserlamelle und teilweise auch auf dem Holz gemessen. Die Biegesteifigkeit wurde vor und nach der Verstärkung ermittelt.

### Resultate und Diskussion

Die Resultate der kleinen Prüfkörper bewiesen die Machbarkeit der Methode. Die Dehnungsmessungen auf der Kohlefaserlamelle zeigten auf, dass die Vorspannkraft wie angenommen über die Länge der Lamelle nicht konstant ist. Aus der linearen Abnahme der Vorspannkraft lässt sich eine konstante Schubkraftverteilung in der Klebstofffuge ableiten. Dies verhindert eine Spannungsspitze am Ende der Kohlefaserlamelle und somit auch eine Delamination. Die Prüfungen an den Proben mit praxisnahen Abmessungen zeigten jedoch auf, dass die Aushärtung des Klebstoffs bei hohen Temperaturen (90°C) nicht unproblematisch ist. Da im Holz, welches an den Klebstoff grenzt, Dampf entsteht. Der Dampf dringt in den Klebstoff ein und führt dort zu

**Herstellung eines kleinen Prüfkörpers. Die Proben mit einem Querschnitt von 40 x 53 Millimetern wurden mit bis zu 225 Kilogramm belastet.**





**4-Punkt-Biegeprüfung gemäss SN EN 408:2003, wie sie im Projekt «Onsite» durchgeführt wurde.**

## «ONSITE»

Das Projekt wurde im Rahmen der «European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research» (Cost) Aktion E34 durchgeführt. Cost Schweiz finanzierte die Schweizer Forschungspartner.

### Forschungspartner

Berner Fachhochschule Architektur Holz und Bau, Biel/Bienne  
Empa Dübendorf  
Ivalsa Italien

### Wirtschaftspartner

Sika Services AG Zürich

### Materialspensoren

Sika Services AG Zürich  
Hiag Handel AG  
Baur Holzbau AG Wettswil

Blasenbildung. Dies konnte durch leichtes Anpressen der Lamelle während dem Aushärten behoben werden. Die Biegefestigkeit der Proben konnte signifikant erhöht werden. Die Biegesteifigkeit war ebenfalls höher. Dies ist aber ein geometrischer Effekt, der unabhängig von der Vorspannung, jedoch abhängig von den Klebstoffeigenschaften ist. Die Biegeprüfungen und die Dehnungsmessungen zeigten auf, dass das entwickelte Berechnungsmodell gut mit den Versuchen übereinstimmt.

Das maximale Biegemoment konnte bei den Prüfkörpern mit einer Abmessung von 120 x 160 Millimeter um ungefähr 30 Prozent und die Biegesteifigkeit (EI) um 13 Prozent erhöht werden. Die verbleibende

Überhöhung von 4 Millimetern sowie das erhöhte EI verbesserten die Gebrauchstauglichkeit um ca. 40 Prozent.

### Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Versuche zeigen, dass die vergleichsweise schnelle und einfache Methode eine Delaminierung der vorgespannten Kohlefaserlamelle verhindert. Bei Umbauten im Wohnhausbereich ist bei Einfeldbalken oft die Wiederherstellung der Gebrauchstauglichkeit der bestehenden Struktur eine grosse Herausforderung. Die hier vorgestellte Methode erlaubt die Sanierung ohne grossen Einfluss auf die Optik und bringt zudem eine signifikante Erhöhung der Tragfähigkeit

mit sich. In diesem Projekt wurde nur das Kurzzeitverhalten untersucht. Es ist deshalb wichtig, dass in einem weiteren Projekt das Langzeitverhalten untersucht wird. Zurzeit laufen an der Empa Untersuchungen bezüglich dem Verhalten bei erhöhten Temperaturen und bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten.

\*Martin Lehmann und Milena Properzi, Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau  
Reto Clénin, Sika Services AG  
Klaus Richter, Empa

#### Literaturverzeichnis

Schnüriger Marco und Brunner Maurice (2004): Timber beams strengthened with prestressed fibres: Delamination; in: Proceedings of the 8th World Conference on timber engineering WCTE 2004 Volume 1; Lathi, Finland  
Schnüriger Marco, Lehmann Martin

und Brunner Maurice (2007): Forschungsbericht: Gradientenvorspannung – Verstärkung von Holzbalken mit Vorgespannten CFK-Lamellen, die in Gradienten verankert sind; BFH-AHB Biel/Bienne

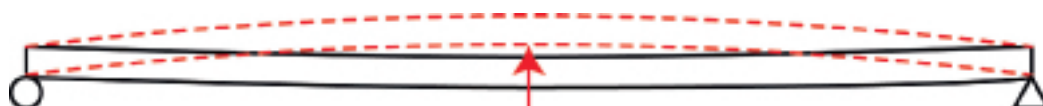
Lehmann Martin et al. (2006): Prestressed FRP for the in-situ strengthening of timber structures; in: Proceedings of the 9th World Conference on timber engineering WCTE-2006 Portland USA

Lehmann Martin (2006): Renforcement sur site de poutres en bois avec de carbone précontraintes; Memoire de Master

Lehmann Martin und Properzi Milena (2006): Forschungsbericht Cost E34 OnSite – An innovative approach for the OnSite reinforcement and rehabilitation of timber structures; BFH-AHB Biel/Bienne

#### Normenverzeichnis

SN EN 408:2003; Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften



**Schwarz dargestellt ist der Balken vor der Sanierung. Das überhöhte System ist rot gezeichnet. Der rote Pfeil symbolisiert die Schalungsstütze. (Bilder: zvg)**